Konrad Zuses Universum

Vollmar, Roland

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 63, 2010, S.63-83

J. Cramer Verlag, Braunschweig

Konrad Zuses Universum*

ROLAND VOLLMAR

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Informatik, Institut für Kryptographie und Sicherheit, Am Fasanengarten 5, 76131 Karlsruhe

Zusammenfassung: Während Konrad Zuse als Computerpionier und Erfinder weltweit bekannt und anerkannt ist, ist er als Wissenschaftler und Visionär nicht seiner Bedeutung gemäß wahrgenommen worden. In diesem Artikel werden einige Facetten dieses Bereichs beleuchtet, und es werden Mutmaßungen über sein geistiges Umfeld angestellt.

Einführung

Der erste Artikel im Spezialheft von „Spektrum der Wissenschaft" zum 2006 im Technikmuseum Berlin veranstalteten Symposium unter dem Titel „Is the universe a computer ?" ist von Konrad Zuse zu seinem „Rechnenden Raum".

So könnte man erwarten, dass ein Aufsatz mit der Überschrift „Konrad Zuses Universum" diesem Konzept gewidmet sei.

Dies ist jedoch nicht (ganz) der Fall: Ich werde vielmehr versuchen, einerseits die geisteswissenschaftlichen Strömungen, die Konrad Zuse beeinflussten, bewusst zu machen und andererseits zu zeigen, wie vorausschauend die Ideen waren, die er bereits – wie auch aus seiner Autobiographie zu entnehmen ist – in den vierziger Jahren hatte und auf die er in seiner zweiten Lebenshälfte öfter zurückkam.

Zur Person und zum geistigen Umfeld

Es werden nur ganz wenige Facetten der überaus reichen Persönlichkeit Konrad Zuses beleuchtet werden. So wird insbesondere seine emotionale Seite nicht angesprochen, hielt er sie doch, wie auch Delius *(Del09)* in seinem Roman über ihn zum Ausdruck bringt, verschlossen.

* Eingegangen 01.06.2010. Dieser Artikel stellt die erweiterte Fassung des Vortrages „Konrad Zuses Universum – Mutmaßungen" dar, der am 20.4.2010 im Deutschen Technikmuseum, Berlin, gehalten wurde.

Anders halten wir es mit seiner künstlerischen Begabung. Er sagt dazu: „Als junger Student war ich einmal im Zweifel, ob es nicht besser wäre, einen künstlerischen Beruf, zum Beispiel den des Reklame-Zeichners zu ergreifen." *(Zus79)* [1]

Und wie hinlänglich bekannt sein dürfte, hat er sich von seiner Schulzeit an bis zu seinem Tode – Unterbrechungen legte ihm nur sein Berufsleben zeitweise auf – zeichnerisch und malerisch betätigt. Die Ergebnisse gehen weit über Hobbyerzeugnisse hinaus, auch wenn er Autodidakt war, aber dies war er ja auch, wie er einmal bemerkte, als Erfinder. M.E. legen nicht nur seine Bilder, sondern auch seine Erfindungen von der Z1 bis zum Helixturm Zeugnis von seiner ungewöhnlich visuellen Begabung und seinem hervorragenden räumlichen Vorstellungsvermögen ab. Auch wenn er in seiner Lebensmitte seine Bilder (vorübergehend) mit dem Pseudonym „Kuno See" signierte, hat er diese Seite nie verleugnet. Anlässlich einer Präsentation in der GMD 1979 sagt er: „ . . . die Hervorhebung meiner technischen Leistungen durch eine Ausstellung meiner künstlerischen Arbeiten zu ergänzen. Besonders befriedigend finde ich es, dass diese Betätigungsfelder nicht mehr als getrennte Richtungen nebeneinander herzulaufen brauchen, sondern dass man darin den Ausdruck eines gemeinsamen Strebens sieht." *(Zus79)*

Was treibt einen Menschen an, sich sein ganzes Leben „strebend" zu betätigen? Konrad Zuse schreibt dazu: „Und ein Weiteres wird vergessen: das, was man die Seele oder das Lebensgefühl nicht aller, aber doch vieler Erfinder nennen könnte. Für sie nämlich ist das Erfinden und Entdecken nicht eine Beschäftigung unter vielen, sondern tatsächlich, wie Oswald Spengler sagt, eine Leidenschaft. In der Figur des Faust hat Goethe diesem Lebensgefühl großartig Ausdruck gegeben."

Konrad Zuse bekennt sich mit dieser Aussage zu seiner Leidenschaft und nennt mit Goethe und Spengler zwei Personen, über deren Wirkung auf ihn ich im folgenden Mutmaßungen anstellen werde.

Für Konrad Zuse war Goethe vor allem als Dichter des „Faust" von Bedeutung, die Gestalt, die auch bei Oswald Spengler eine wesentliche Rolle spielt.

Kurz etwas zu Spenglers Hauptwerk „Der Untergang des Abendlandes", wobei der Titel eher ein „Mißverständnis" *(Kin82)* befördert. „Spengler entwirft in seinem Hauptwerk das Panorama einer für ihn spezifischen Geschichtsphilosophie. [...] [Er entwickelt] [...] ein metaphysisch verwurzeltes System, welches den Anspruch erhebt, die gesamte höhere Kulturgeschichte zu erklären und sogar kommende Entwicklungen vorauszusagen." *(Wi10a)* So lautet der erste

1 Die Rechtschreibung der Zitate ist der aktuell üblichen angepasst.

Satz dieses Werkes: „In diesem Buche wird zum erstenmal der Versuch gewagt, Geschichte vorauszubestimmen." Ich stelle mir vor, dass allein schon dieser Anspruch einen rational denkenden Menschen wie Konrad Zuse – zumindest in seiner Jugend – faszinierte.

„Polarstern an Spenglers Bildungshimmel blieb GOETHE; verwandt empfand er dessen >lebendige Natur<, Intuition der Phänomene, organische Entwicklungsidee und vergleichende Morphologie." *(Kin82)*

Spengler sieht die abendländische Kultur als eine faustische an: „... aus dem leidenschaftlichen faustischen Hang zum Unendlichen ..." *(Spe79)*

In *(Zus68)* (wie auch in weiteren Veröffentlichungen) greift Konrad Zuse dies auf: „In unserer Spätzeit findet die Faustische Seele ihren wichtigsten Ausdruck in der modernen Technik. Auch andere Kulturen kannten etwas, was man als Technik bezeichnen kann. Aber unsere typisch Faustische Technik ist doch etwas ganz anderes, einmaliges, für das es keine Parallele in anderen Kulturkreisen gibt. Die entsprechenden Kapitel bei Spengler sind natürlich für den jungen Ingenieur besonders interessant. Im Gegensatz zu dem Spengler im allgemeinen zugeschriebenen Pessimismus ist hier die Möglichkeit für eine durchaus optimistische, zukunftsweisende Betrachtungsweise gegeben."[2]

Und auch zur Mathematik stellt Spengler Verbindungen her, wie er überhaupt erstaunlich ausführlich auf deren Kultur eingeht: Mathematik bezeichnet er als „Abbild und reinster Ausdruck der Idee des faustischen Seelentums" *(Spe79)* und schreibt an anderer Stelle: „Demgegenüber ließen die magische und faustische Seele ihre steinernen Traumgebilde als Überwölbungen bedeutungsvoller Innenräume emporsteigen, deren Struktur den Geist zweier Mathematiken, der Algebra und der Analysis, vorwegnimmt." *(Spe79)* Liest man den folgenden Satz „Mit dem faustischen Geiste dieser fast wandlosen, hochgewölbten, farbig durchschimmerten, zum Chore strebenden Kirchenschiffe vergleiche man die Wirkung arabischer [...] Kuppelbauten" *(Spe79)* und sieht gewisse Bilder von Konrad Zuse, so könnte man glauben, er wollte Spengler illustrieren *(*s. Abb. 1*)*.

Mag dies noch eine zufällige Verwandtschaft sein, so gibt es aber auch explizite Äußerungen von Konrad Zuse: „Dagegen machte auf viele von uns [...] Oswald Spengler nachhaltigen Eindruck. Heute wissen wir, mit welch erstaunlichem Weitblick dieser große Gelehrte die Geschichte unseres Jahrhunderts vorausgesehen hat." *(Zus84)*

2 In diesem ersten Konzept seiner Autobiographie *(Zus68)* nimmt Konrad Zuse deutlich häufiger Bezug auf Oswald Spengler als in der ausgearbeitetenVersion *(Zus84)*.

Abb.1: Gemälde von Konrad Zuse *(Privatarchiv Horst Zuse).*

Konrad Zuse wurde in Berlin geboren und betrachtete diese Stadt immer als seine „eigentliche Heimat“. Preußen war aber nicht nur seine physische sondern auch seine geistige Heimat. Er schreibt dazu – und stellt dabei eine Verbindung zu Oswald Spengler her: „Da ich mich zum Preußentum durchaus bekenne, möchte ich wenigstens einen kurzen Abschnitt aus seinem [Oswald Spenglers] Buch 'Preußentum und Sozialismus' zitieren, das mich seinerzeit sehr angeregt hat.“ *(Zus84)*

M.E. könnten auch die folgende Aussage Oswald Spenglers Eindruck auf Konrad Zuse gemacht haben, bestätigte sie ihn doch in der – wie wir schon sahen – nicht unreflektierten Wahl seiner Studien: „Wenn unter dem Eindruck dieses Buches sich Menschen der neuen Generation der Technik statt der Lyrik, der Marine statt der Malerei, der Politik statt der Erkenntniskritik zuwenden, so tun sie, was ich wünsche, und man kann ihnen nichts Besseres wünschen.“ *(Spe79)*

Wenn es auch noch mehr aus „Der Untergang des Abendlandes“ und aus anderen Schriften Oswald Spenglers zu zitieren gäbe, das die Faszination Konrad

Zuses für ihn plausibel werden lässt, so darf aber auch nicht verschwiegen werden, dass Oswald Spengler Ansichten vertrat, die denen Konrad Zuses diametral entgegenstanden. Ich denke da insbesondere an Spenglers skeptische Äußerungen zur Kausalität.

Zum Abschluß dieses ersten Teils meines Artikels gebe ich nochmals Zuse das Wort, um seine Beziehung zu Goethe zu beleuchten: „Uns ist's in unserer faustischen Kultur aufgegeben, immer weiter zu steigen und Besseres zu schaffen, und die Natur zu erforschen. Was das wirklich für einen Sinn hat, das können wir im Augenblick nicht erfassen. Und wir haben es immer mit widrigen Elementen zu tun. Aber: Wer immer strebend ist *(sic!)* bemüht, den können wir erlösen! Das könnte die Botschaft sein, die Goethe gegeben hat." *(Zus85)*

Ursprünge der wissenschaftlichen Konzepte Konrad Zuses

In diesem Teil des Artikels soll nicht das Thema, wohl aber der Gesichtswinkel eine Änderung erfahren. Er umkreist wissenschaftliche Ideen und Arbeiten aus Konrad Zuses zweiter Lebenshälfte. Dies soll natürlich nicht eine Geringschätzung des erfinderischen Genies Konrad Zuse implizieren, vielmehr sollen hier seine großartige Intuition und sein wissenschaftlicher Weitblick herausgestellt werden.

Auf drei Konzepte Konrad Zuses wird näher eingegangen:

- Feldrechenmaschine
- Rechnender Raum
- Selbstreproduktion

In allen drei Bereichen spielen Zellularautomaten eine (unterschiedlich ausgeprägte) Rolle.[3] Einige Grundlagen ihrer Theorie werden zunächst (auf die Thematik dieses Artikels spezifiziert) skizziert.

Formal ist ein Zellularautomat charakterisiert durch

$$(Q, d, N, \delta)$$

Informell: In den Gitterpunkten eines d-dimensionalen Euklidischen Raumes $\mathbf{Z}^d$ befinden sich gleichartige endliche Automaten, die nach einem Nachbarschaftsschema N in einer im ganzen Raum gleichen Weise miteinander verbunden sind (d.h. direkt Information austauschen können). Sie besitzen alle

[3] In *(Zus77)* führt Konrad Zuse die beiden erstgenannten Gebiete als auf Zellularautomaten bezogene Forschungen auf, nicht aber die Selbstreproduktion.

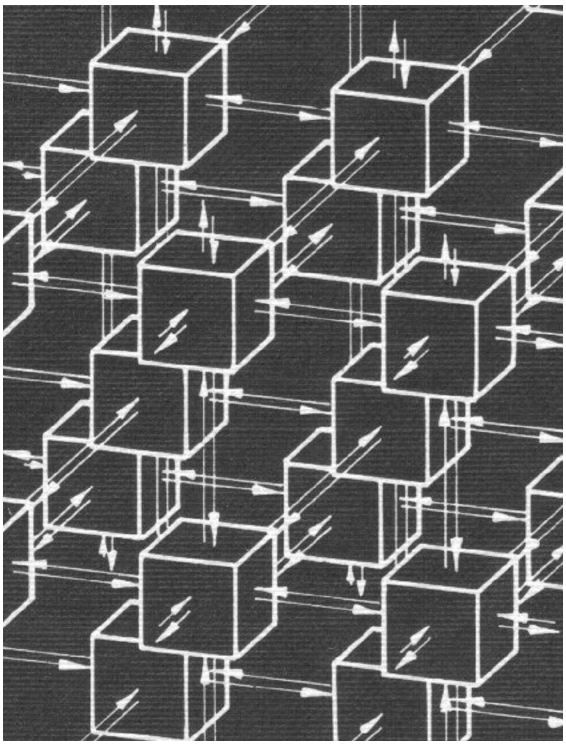
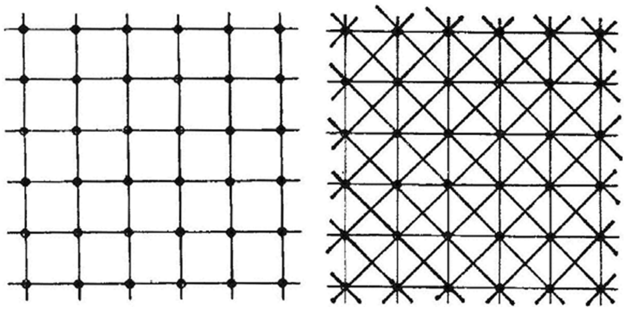


Abb. 2: Von-Neumann-Nachbarschaft im dreidimensionalen Raum

dieselbe endliche Menge von Zuständen Q und arbeiten in deterministischer Weise gemäß derselben Überführungsfunktion δ. Ein globaler Taktgeber stößt die Zustandsänderungen, abhängig vom eigenen Zustand des Einzelautomaten und den Zuständen der direkt mit ihm verbundenen Nachbarn, an (Synchronität).

Bei der Betrachtung von Zellularautomaten sticht zunächst die Nachbarschaftsstruktur ins Auge. Die Abbildungen 2 und 3 liefern Beispiele dafür.

Es lässt sich allerdings zeigen, dass man mit sehr einfachen Strukturen auskommt, nämlich solchen, bei denen es in jeder Raumdimension eine Verbindung gibt. Derartige „Vereinfachungen" haben Rückwirkungen auf die Einzelautomaten, genauer auf deren Zustandszahl und damit auf ihre Überführungsfunktion. Hier werden der Einfachheit halber nur symmetrische Nachbarschaften wie sie in Abb. 2 für den dreidimensionalen und in Abb. 3 für den zweidimensionalen Raum dargestellt sind, betrachtet.



a) b)

Abb.3: a) Von-Neumann- und b) Moore-Nachbarschaft im zweidimensionalen Raum

Wozu sind Zellularautomaten gut?

Sie werden in den letzten Jahren zunehmend zur Modellierung biologischer und chemischer Systeme benutzt, ebenso für solche technischer und soziologischer Natur.

Auch das weithin bekannte „Game of Life“, das von J.H. Conway vorgeschlagen und wohl 1966 zuerst von M. Gardner publiziert wurde und das als Solitärspiel oder auch als „no-player game“ *(Ber85)* bezeichnet wird, ist ein Zellularautomat. Er ist charakterisiert durch eine zweidimensionale Struktur mit einer in Abb. 3b dargestellten sog. Moore-Nachbarschaft. Die einzelnen Automaten besitzen (nur) zwei Zustände, „lebendig“ und „tot“. Die Überführungsfunktion ist eindeutig folgendermaßen festgelegt:

– Ein Automat, der zum Zeitpunkt t „tot“ ist, wird zum Zeitpunkt $t+1$ „lebendig“, wenn genau drei seiner acht Nachbarn zum Zeitpunkt t „lebendig“ sind.

– Ein Automat, der zum Zeitpunkt t „lebendig“ ist, bleibt „lebendig“ (zum Zeitpunkt $t+1$), genau dann, wenn er zum Zeitpunkt t zwei oder drei „lebendige“ Nachbarn hat. Andernfalls geht er (zum Zeitpunkt $t+1$) in den Zustand „tot“ über.

Die Überführungsfunktion wurde so festgelegt, dass sie „interessante“ Entwicklungen garantiert. Das „Spiel“ besteht darin, eine Anfangsbelegung endlich vieler Automaten anzugeben und zu beobachten, wie sich der Zellularautomat mit der Zeit verändert – und dies ist in den meisten Fällen global nicht vorhersehbar, obwohl deterministisches Verhalten programmiert ist.

Die Eigenart von Zellularautomaten kommt in diesem einfachen Beispiel schön zum Ausdruck: Die einmalige Definition der Überführungsfunktion bestimmt die globale Entwicklung für alle Zeiten. Beim Entwurf von Algorithmen für

Zellularautomaten, sog. myopischen Algorithmen, die für bestimmte Aufgabenlösungen eingesetzt werden sollen, kann man natürlich zu erheblich komplexeren Überführungsfunktionen gelangen, insbesondere wenn die Zustandszahl größer als beim Game of Life ist.

Die Feldrechenmaschine

Parallelverarbeitung, d.h. der gleichzeitige Einsatz vieler Automaten bzw. Rechner beschleunigt Berechnungen. Auch wenn nicht alle Probleme (echt) mit Zellularautomaten parallelisierbar sind, ist dies doch für viele, auch praktisch relevante der Fall. Dazu gehören u.a. partielle Differentialgleichungen, die z.B. Wellenausbreitungen, wie sie in der Meteorologie untersucht werden, beschreiben. Dies war auch der Ausgangspunkt von Konrad Zuse, die ihn zu seinem – übrigens auch patentierten – Konzept der Feldrechenmaschine, veröffentlicht 1958, führten:

„Unter einem 'Wertefeld' oder kurz 'Feld' sei [...] die im allgemeinen zweidimensionale gitterartige Anordnung von Werten verstanden. [...]

Bei der numerischen Durchrechnung von partiellen Differentialgleichungen werden nun die einzelnen Werte solcher Felder in verschiedener Weise kombiniert. Dabei fallen häufig Folgen von Operationen an, welche sich in gleicher Weise auf sämtliche Werte eines oder mehrerer Felder erstrecken.“ *(Zus58)*

Aus diesen Worten ist m.E. offensichtlich, dass Konrad Zuse das Konzept eines Zellularautomaten zumindest im Hinterkopf hatte. In den Einzelautomaten eines Zellularautomaten lassen sich natürlich auch Zahlen repräsentieren, allerdings nur aus einem endlichen Intervall. Approximativ lässt sich dann iterativ eine Lösung der Differentialgleichung durch gewichtete Durchschnittsbildung der jeweils benachbarten Zellen gewinnen.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass auch John von Neumann, der die Theorie der Zellularautomaten begründete, lange Zeit mit der Lösung hydrodynamischer Probleme und dadurch mit der schrittweisen Berechnung der entsprechenden Differentialgleichungen auf gitterförmigen Strukturen befasst war.

In Abb. 4 ist die Feldrechenmaschine schematisch dargestellt. Für die nachfolgende Beschreibung sei der Einfachheit halber angenommen, dass quadratische zweidimensionale Matrizen der Größe *kxk*, das „Feld“, zu bearbeiten seien. Der Wert von *k* wird bei einer Hardwareimplementierung vom Stand der Technik bestimmt werden. Dies gilt auch für die einzusetzenden Speichermedien. Wie aus der Abb. 4 zu entnehmen ist, stellte sich Konrad Zuse vor, dass die Felder auf einer Magnettrommel abgelegt seien. Und zwar sollten jeweils alle Elemente

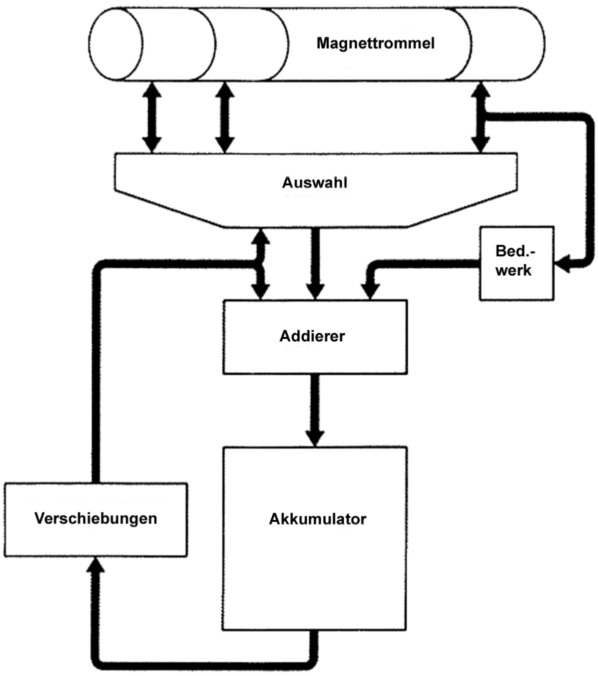


Abb. 4: Struktur der Feldrechenmaschine (aus *(Vol95)*).

einer Spalte auf einer Spur und nebeneinander liegende Spalten auf nebeneinander liegende Spuren der Trommel gespeichert werden. Daher konnte jeweils eine ganze Zeile einer Matrix auf einmal von der Trommel gelesen werden. Da sie unter Umständen Platz für mehrere Felder nebeneinander bot, war ein Auswahlwerk vorgesehen, über das eine Zeile *einer* Matrix an die „Verarbeitungseinheit" geliefert wurde. Sie bestand aus einem k Einzeladdierer umfassenden „Vektoraddierwerk", das zwei Matrixzeilen in allen Komponenten gleichzeitig (bitsequentiell) addieren konnte.

Die Ergebnisse wurden in einen Akkumulator geschrieben, der eine ganze kxk-Matrix aufnehmen konnte. Während ein Summand jeweils von der Magnettrommel gelesen wurde, stammte der andere aus dem Akkumulator. Auf dem Weg zum Addierwerk sollten durch geeignete Hardware noch verschiedene Verschiebungen ermöglicht werden. Jedes Element sollte in der Matrix um eine Zeile „nach oben" bzw. „unten" oder um eine Spalte „nach links" bzw. „rechts" verschoben werden können. Außerdem war an die (durch einfache Verschiebungen auf Bitniveau realisierbare) Verdoppelung und Halbierung der Werte gedacht. Natürlich sollte der Akkumulatorinhalt auch auf die Trommel abgespeichert werden können.[4]

Mit der Feldrechenmaschine hat Konrad Zuse vor über 50 Jahren das Konzept eines sog. SIMD-Rechners vorgestellt, wobei SIMD Akronym für „single instruction, multiple data" ist. In solchen Computern wird für „mehrere Daten" jeweils die gleiche Operation ausgeführt. Dies wird von mehreren Rechenwerken jeweils unabhängig voneinander gleichzeitig vorgenommen. Konrad Zuse beschreibt, wie er ausgehend von dem Plan, Rechner für die numerische Lösung partieller Differentialgleichungen einzusetzen, den Feldrechner konzipierte: „Als ich mich mit dem Problem zu beschäftigen begann, wollte ich zunächst auf eine meiner alten Ideen zurückgreifen: auf den Plan von der Rechenmaschine aus vielen parallelen Rechenwerken, die gitterartig angeordnet sind und miteinander in Beziehung stehen. Heute nennt man so etwas einen Zellularen Automaten." *(Zus84)*

Bemerkenswert an diesem Zitat ist, dass Konrad Zuse die Idee des Zellularautomaten schon etwa Mitte der 50er Jahre bekannt war, ja er sogar von seiner „alten Idee" spricht. Dies ist insofern erstaunlich, als das Buch John von Neumanns „Theory of Self-Reproducing Automata", das Arthur Burks nach Skripten und Notizen von Neumanns ergänzte und ausarbeitete, erst 1966 erschienen ist *(Neu66)*. Es gab allerdings zuvor schon Publikationen über Zellularautomaten, wobei die von S. Ulam, der zusammen mit von Neumann auf diesem Gebiet arbeitete, von 1952 wohl eine der ersten ist. *(Ula52)*

Es erscheint mir aber höchst unwahrscheinlich, dass Konrad Zuse Mitte der 50er Jahre entsprechende Literatur gekannt haben sollte. Ich stütze mich dabei nicht nur auf seine anzunehmende Belastung als Unternehmer in dieser Zeit, sondern auf die Passage eines Briefes, den Heinz Zemanek am 23.3.1959 an Konrad Zuse schrieb: „In Bad Hersfeld haben Sie noch gefragt, wo die 'fortpflanzende Maschine' nach J. von NEUMANN veröffentlicht ist." *(Zem59)*

Im weiteren gibt Zemanek die folgende Literatur an:

J.G. KEMENY, Man viewed as a machine. Sci. American 192 (1955), No. 4, 58–67.

In diesem Artikel referiert Kemeny sowohl eine Reihe von Vorlesungen, die John von Neumann kurze Zeit zuvor an der Princeton University über „a detailed comparison of human and mechanical brains" hielt, als auch über von Neumanns Konzeption der Selbstreproduktion *(Kem55).* Letztere lag damals wohl nur in rudimentärer Form vor.

---

4 Dieser Absatz ist teilweise wörtlich aus *(Vol05)* entnommen.

Rechnender Raum

Im folgenden kommen wir mit dem Rechnenden Raum auf einen anderen Zellularautomaten zu sprechen, der Konrad Zuse – betrachtet man die Zahl seiner Veröffentlichungen dazu – besonders am Herzen lag.

W. Gerlach stellte im Geleitwort zu *(Zus75)* die Frage: „Wird Konrad Zuses Rechnender Raum die Dissonanz von Determinismus und Wahrscheinlichkeit auflösen ?“

Wie erwähnt, teilte Konrad Zuse nicht die Skepsis Oswald Spenglers hinsichtlich Kausalität. Dass ihn dieses Problem beschäftigte, geht auch aus seiner Autobiographie hervor: „Ich glaube, die meisten Forscher, die in der einen oder anderen Weise an der Entwicklung des Computers beteiligt waren, haben sich irgendwann einmal mit der Frage nach dem Verhältnis von menschlicher Willensfreiheit und Kausalität befasst. Schließlich ist es eine Frage, die den Menschen seit dem Beginn der Philosophiegeschichte beschäftigt, und der Gedanke ist naheliegend, dass sie durch die Computerentwicklung in eine neue Perspektive gerückt wird. Auch ich glaubte, in dieser Frage Stellung beziehen zu sollen, und verfasste eine Abhandlung „Freiheit und Kausalität im Lichte der Rechenmaschine“. Ich verfügte weder über eine Bibliothek noch über die nötigen philosophischen Grundlagen. [...] Das Problem aber hat mich von da an nicht mehr losgelassen. [...] Es geschah bei den Betrachtungen über die Kausalität, dass mir plötzlich der Gedanke auftauchte, den Kosmos als eine gigantische Rechenmaschine aufzufassen. Ich dachte dabei an die Relaisrechner: Relaisrechner enthalten Relaisketten. Stößt man ein Relais an, so pflanzt sich dieser Impuls durch die ganze Kette fort. So müsste sich auch ein Lichtquant fortpflanzen, ging es mir durch den Kopf. Der Gedanke setzte sich fest; ich habe ihn im Laufe der Jahre zur Idee des 'Rechnenden Raumes' ausgebaut.“ *(Zus84)*

Auch hier sei wieder die Zeit genannt: Es ist von dem Aufenthalt von Zuses (damals noch kleiner) Familie in Hinterstein 1945/46 die Rede.

Die Veröffentlichungen der Gedanken zum Rechnenden Raum erfolgen ab 1967 (in Buchform mit dem Titel „Rechnender Raum“ *(Zus69)* 1969).

Die Grundannahme von Konrad Zuse besteht darin, das Universum als granular strukturiert anzusehen, d.h. es als Zellularautomaten zu betrachten, in dem der Abstand der Gitterpunkte deutlich kleiner als die Elementarlänge (10^{-15} m) ist. Konfigurationen stellen sich als sog. Digitalteilchen dar, die als Gebilde einer Größe weit unter der von Atomen und Elektronen zu sehen sind und die nur endlich viele Zustände annehmen können. Sie reagieren miteinander nach deterministischen Regeln, wobei gewisse Erhaltungsgesetze gelten. Trotz des deterministischen Verhaltens treten bei der Wechselwirkung solcher Digitalteilchen Phänomene auf, die scheinbar zufällig sind, aber lediglich durch unterschiedliche Abstände bedingt sind, oder wie Konrad Zuse sagt, von der

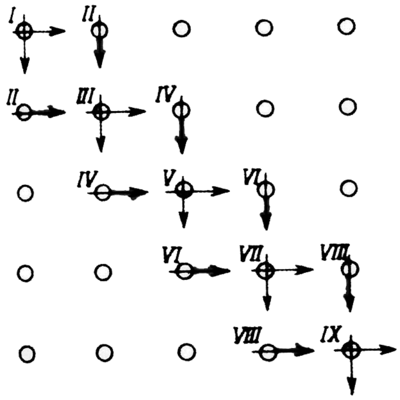


Abb. 5: Bewegung eines Digitalteilchens im zweidimensionalen Raum (aus *(Zus93)*).

„Abstandsphasenlage“ abhängen. Unter anderem impliziert diese Auffassung, dass in jedem (endlichen) Teil des Raumes nur endlich viel Information vorhanden ist. Alles Geschehen im Universum ist dann Ausdruck des „Rechnenden Raumes“.

In Abb. 5 ist die Bewegung eines freien Digitalteilchens mit gleichbleibender Geschwindigkeit skizziert.

Kreuzen sich ihre Bahnen, beeinflussen sie sich abhängig von der Abstandsphasenlage entweder nicht, oder es wird ein neues Teilchen aus der Kollision hervorgehen (Abb. 6 resp. Abb. 7)

Es können sich bei der Reaktion von Digitalteilchen aber auch Konfigurationen herausbilden, die von außen gesehen „stabil“ sind, solange nicht andere Teilchen auf sie einwirken.

Solche Effekte lassen sich auch im Game of Life beobachten. Im Rechnenden Raum ist aber im Gegensatz zu dort die Überführungsfunktion unter Berücksichtigung physikalischer Gesetze entworfen, z.B. gelten gewisse Erhaltungsregeln. Im Game of Life können dagegen auch sehr große Konfigurationen in einem Übergang „verschwinden“, d.h. beliebig viele „lebendige“ Automaten können in einem Schritt den Zustand „tot“ annehmen.

In *(Ber85)* ist auf E. Fredkin verwiesen, der eine Konrad Zuse sehr ähnliche Auffassung vertritt: „Man kann sich sogar vorstellen, dass die zugrundeliegende Raum-Zeit ihrerseits 'gekörnt' ist, also aus diskreten Einheiten zusammengesetzt, und dass das ganze Universum eigentlich nichts ist als ein Zellen-Automat, den ein riesiger Computer dirigiert – dies ist ein Vorschlag von Edward Fredkin (M.I.T.) und anderen. Ist das so, so ist das, was wir landläufig Bewegung nennen, nur simulierte Bewegung.

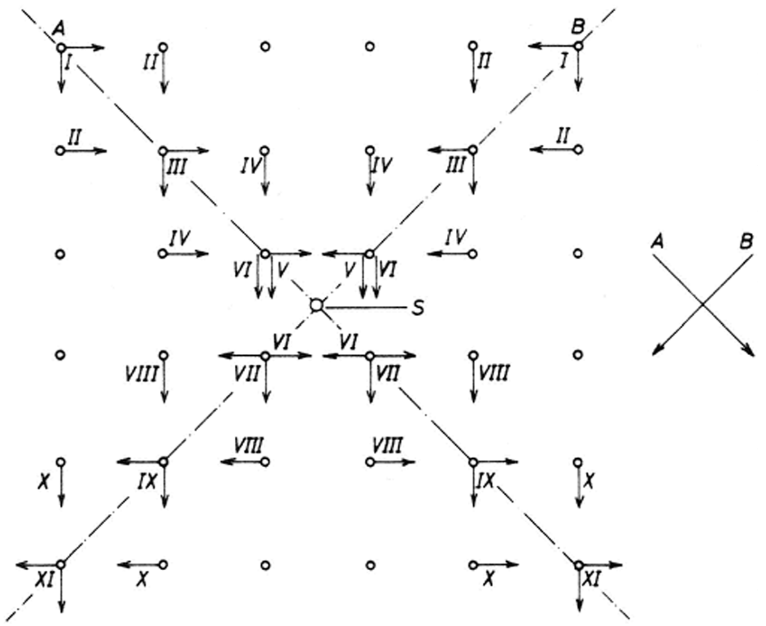


Abb. 6: Sich kreuzende Digitalteilchen (ohne Reaktion) (aus *(Zus69)*).

Ein bewegtes Teilchen auf dem absoluten Mikro-Niveau könnte dann nichts anderes sein als so etwas wie einer von unseren Gleitern[5], der so aussieht, als bewege er sich auf dem Makro-Niveau, während es sich in Wahrheit immer um Zustandsänderungen elementarer Raum-Zeit-Zellen handelt, die nach noch zu entdeckenden Übergangsregeln ihre Zustände ändern.“

Die unterschiedliche Bewertung, die Konrad Zuses Konzept des Rechnenden Raumes erfuhr, muß im Zusammenhang mit der zwiespältigen Haltung einer Reihe von Wissenschaftlern zu Zellularautomaten überhaupt gesehen werden. Über John von Neumanns grundlegende Arbeit schreibt z.B. Macrae *(Mac94):*

„Seine Visionen von zellulären Automaten werden von einigen Leuten noch immer für allzu ausgefallen gehalten.“

In neuerer Zeit werden auch in der Physik Überlegungen geäußert, die die zitierten Hypothesen nicht mehr allzu ungewöhnlich erscheinen lassen, so z.B. von Rees *(Ree03)*: „Einsteins Theorie ist jedoch insofern unvollständig, als sie Raum

---

5 Im Game of Life sind „Gleiter“ Konfigurationen, die sich in der Ebene bewegen.

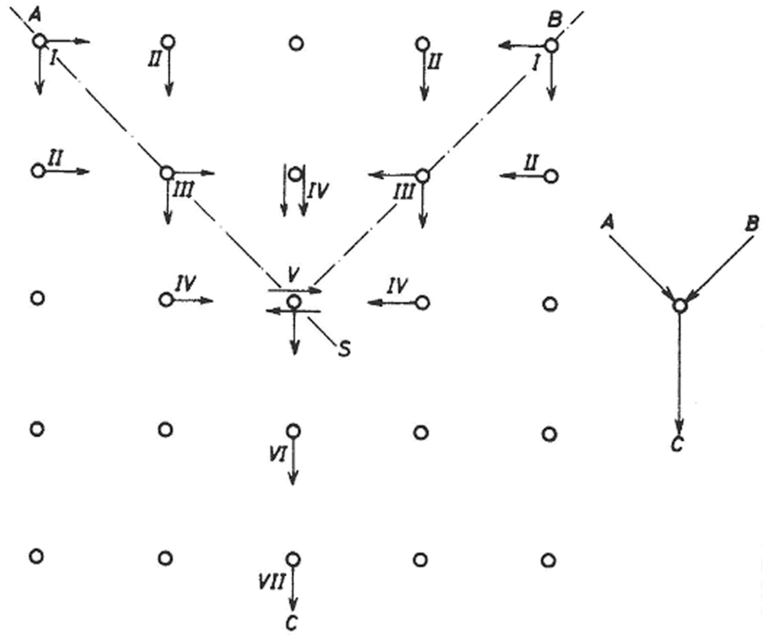


Abb. 7: Sich kreuzende und miteinander reagierende Digitalteilchen (aus *(Zus69)*).

und Zeit als ein fließendes Kontinuum behandelt. Wenn wir ein Stück Metall [...] in immer kleinere Stücke zerhacken, stoßen wir auf dem Quantenniveau der einzelnen Atome schließlich an eine Grenze. Im allerkleinsten Maßstab rechnen wir damit, dass sogar der Raum selbst körnig ist. Vielleicht besteht nicht nur der Raum, sondern auch die Zeit aus endlichen Quanten, anstatt kontinuierlich zu 'fließen'."

In dem eingangs erwähnten Symposium sagt Thiemann *(Thi07)*: „Die Theorie der Schleifen-Quantengravitation unterteilt den Raum in Quanten. Sie beschreibt den Raum in kleinstmöglichen >Volumenquanten< [...] Die Zeit läuft ebenfalls nicht kontinuierlich, sondern tickt in der kleinsten Zeiteinheit, der Planck-Zeit [...]" Und weiter: „Jedenfalls zeigen diese Überlegungen zu Schwarzen Löchern, dass der Bogen von der Grundlagenphysik zu Zuses Metapher vom >rechnenden Raum< möglich ist."

Seth Lloyd konstatiert *(Llo07)* : „Das Computer-Paradigma des Universums ergänzt das herkömmliche mechanistische Paradigma: Das Universum ist nicht nur eine Maschine – es ist eine Maschine, die Information verarbeitet. Das rechnende Universum ist keine Metapher, sondern eine mathematische Tatsache: Es ist ein physikalisches System, das auf seiner untersten mikroskopischen Ebene programmiert werden kann, um universelle digitale Rechenoperationen durchzuführen."

Ich maße mir nicht an, die Für- und Wider-Argumente von Physikern zu Zuses Rechnendem Raum zu bewerten. Vielmehr will ich darauf hinweisen, dass Konrad Zuse seine dahingehenden Überlegungen nicht als „wohlbegründete und reife Theorie" *(Zus82)* betrachtete und sich insbesondere bewusst war, dass die dem Rechnenden Raum inhärente Anisotropie physikalisch wohl kaum zu begründen sei.[6] Ich schließe mich der Aussage von Jürgen Alex *(Ale07)* an, der feststellt, dass die Konzeption des rechnenden Raumes „nicht überprüft und nicht überprüfbar, nicht *lege artis* als falsifizierbare Theorie formuliert" ist.

Wohl aber ist die Betonung der „Information" in der physikalischen Welt durch Konrad Zuse nicht hoch genug einzuschätzen. Aussagen dazu sind u.a. bei Feynman zu finden (z.B. *(Ila01)* und bei Bekenstein *(Bek03)*: „Es gibt sogar eine Interpretation der Quantentheorie, initiiert durch John A. Wheeler von der Universität Princeton, wonach die physikalische Welt eigentlich aus Information besteht, während Energie und Materie nur Oberflächenphänomene sind."

Und B. Falkenburg und R. Huber schreiben *(Fal07)*: „Die Vorstellung eines rechnenden Raumes geht davon aus, dass alle physikalischen Prozesse endliche, digitale Information übertragen. Dieser Gedanke schlägt eine Brücke zwischen Physik und Informationstheorie. Eine solche Brücke gibt es schon länger: In der Nachrichtentechnik ist nämlich die Information, die in einer Nachricht kodiert ist, formal genau so definiert wie die physikalische Größe der Entropie. [...] Zuses Vorstellung eines rechnenden Raumes verallgemeinert diese Beziehung zwischen Physik und Informationstheorie auf sämtliche physikalischen Prozesse. Diese Verallgemeinerung hat mittlerweile auf etlichen Gebieten der Physik zu großen theoretischen Fortschritten geführt."

Selbstreproduktion

Ein weiterer großer Gedanke beschäftigte Konrad Zuse mindestens seit Mitte der vierziger Jahre und ließ ihn zeitlebens nicht mehr los: „Die Gedanken über den Plankalkül, über das Verhältnis von Willensfreiheit und Kausalität, über den Rechnenden Raum und Sich-selbst-reproduzierende Systeme kulminierten schon in der Hintersteiner Zeit in einem einzigen Punkt: in der Idee der 'technischen Keimzelle'" *(Zus84)*

[6] Im Zusammenhang mit Zellularautomaten beschäftigte sich auch R. Feynman mit diesem Problem: „Feynman had a proposed solution to the anisotropy problem which he attempted (without success) to work out in detail." *(HiloJ)*

Um die Bedeutung dieser Konzeption und Konrad Zuses auch in dieser Hinsicht erstaunlich treffende Intuitionsgabe entsprechend würdigen zu können, werde ich etwas ausholen.

Stellt man sich eine Fabrik vor, so wird man kaum anderer Meinung sein, als dass deren Produkte „einfacher" sein müssen als die Fabrik selbst. So wird wohl niemand auf den Gedanken kommen, dass z.B. eine Chip-Fabrik etwas so hochkomplexes wie es eine solche Fabrik darstellt, produzieren könne. Anders sieht dies aber bei Lebewesen aus. Täglich wird uns vor Augen geführt, dass deren Abkömmlinge zumindest in etwa gleich komplex wie ihre Erzeuger sind. Beschränkt man die Betrachtungen auf abstrakte Gebilde, z.B. Automaten, so muß der Begriff „Selbst-Reproduktion" näher untersucht werden.

Konrad Zuse gibt sich manchmal mit einer sehr einfachen Art zufrieden, z.B. bei Digitalteilchen: „ ... geht jeder folgende Zustand aus dem vorhergehenden hervor; jedoch kann sich das gesamte Muster dabei bewegen. In diesem Sinne kann man Digitalteilchen auch als 'sich selbst reproduzierende Systeme' auffassen." *(Zus69)*

Nach dieser Auffassung würden auch Programme, die ihren eigenen Programmtext kopieren oder ausdrucken oder Zellularautomaten mit Überführungsfunktionen, die auf einer modulo-Addition beruhen und damit Kopien beliebiger Konfigurationen erzeugen, selbst-reproduzierend sein.

Ein etwas komplexeres Beispiel ist „Langton's Loop". In einem zweidimensionalen Zellularautomaten sind etwa 100 Automaten in Form der Außenlinien eines Quadrates mit einem „Schwänzchen" eingebettet. Im Laufe der Zeit lagern sich um das ursprüngliche Muster weitere solche Quadrate an. *(Lan84)*

Unbefriedigend bei diesen Beispielen ist die Tatsache, dass wohl Gebilde reproduziert werden, diese selbst aber nichts „Nützliches" tun. Die stärkste Forderung, die man in diesem Zusammenhang stellen kann, ist die der Berechnungsuniversalität der selbst-reproduzierenden Gebilde.

Bereits 1948 zeigte J. von Neumann, dass auch unter dieser Bedingung Selbst-Reproduktion logisch möglich ist, hatte aber noch keine (auch keine abstrakte) Konstruktion erarbeitet[7]. Eine solche wurde letztlich mit Zellularautomaten erreicht, von von Neumann jedoch nur skizziert, und wie bereits bemerkt in von A. Burks ausgearbeiteter Form 1966 publiziert.

Als Konrad Zuse 1957 in seinem Vortrag *(Zus57)* zum Erhalt seines ersten Ehrendoktors an der TU Berlin die „technische Keimzelle" diskutierte, hatte er von den Arbeiten von Neumanns wahrscheinlich gehört, wusste aber, wie der bereits erwähnte Brief von Zemanek an ihn von 1959 belegt, wohl nichts Näheres.

---

7 s. Anhang.

In einem Aufsatz von 1967 *(Zus67)* ist dieses Thema nochmals aufgegriffen, jedoch unter stärker produktionstechnischer Sicht abgehandelt. Konrad Zuse hatte vom Bundesforschungsministerium den Auftrag zu einer Machbarkeitsstudie erhalten und 1966 ein Modell einer Montagestraße in seiner eigenen Werkstatt gebaut. Er hatte dabei eine ingenieurmäßige Realisierung selbstreproduzierender Systeme im Blick und wollte sich damit wohl von dem rein theoretischen Konzept John von Neumanns absetzen.

Ich werde einige Absätze aus dem Artikel von 1957 *(Zus57)* zitieren, zunächst eine Idee, mit der er sich von von Neumann unterscheidet, wobei auch schon technische Aspekte berücksichtigt sind: „Nun darf man die Fragestellung wohl nicht so eng fassen, dass man eine einzige Maschine bauen müsste, die sich selbst nachbaut, sondern man wird dabei von einer ganzen Werkstatt bzw. Fabrik ausgehen müssen, da nur diese die nötige Mannigfaltigkeit der verschiedenen Einzelteile und Fertigungsprozesse aufweisen kann. [...] Der Gedanke lässt sich noch weiter verfolgen. Bei der sich selbst nachbauenden Werkstatt haben wir es mit einer homogenen Reihe zu tun, wobei in zyklischer Folge stets die gleiche Form hergestellt wird. Wenn man diese Stufe der Technik erst einmal erreicht hat, kann man wohl leicht die Programmabläufe dieser Fertigungsprozesse so beeinflussen, dass eine von Stufe zu Stufe komplizierter werdende Reihe von Produktionsstätten entsteht. Man kommt dann zu dem Problem der technischen Keimzelle. Die Frage, welche dann die größte Bedeutung hat, ist folgende: Welche einfachste Form einer Anfangswerkstatt ist erforderlich, um aus ihr ein vollständiges Industriewerk auskristallisieren zu lassen ?“[8, 9]

Es folgen noch Bemerkungen zur Variation der Größe solch einer Keimzelle, in unserem Kontext sind aber abschließenden Bemerkungen von größerem Interesse, da sie den Kreis des hier Besprochenen schließen: „Rein mathematisch gesehen wird das Keimzellen-Problem im Rahmen unserer abendländischen Mathematik, wie ich glaube, ebenfalls die größte Bedeutung bekommen. Wir sehen in dem

---

8 In Wikipedia (wi10b) findet sich ein umfassender Überblick (unter dem Titel „Self-replicating machine“) über selbst-reproduzierende Systeme – Konrad Zuse wird allerdings nicht erwähnt.

Die Begriffe „self-replicating“ and „self-reproducing“ werden in der Literatur weitestgehend synonym verwandt.

F.J. Dyson hat jedoch eine dezidiert andere Sicht: „'In heutigen Diskussionen über den Ursprung des Lebens wird oft als selbstverständlich angenommen, dass der Ursprung des Lebens mit dem Ursprung der Replikation identisch ist' schrieb er [Freeman J. Dyson] und wies darauf hin, dass 'es wichtig ist, an dieser Stelle eine genaue Unterscheidung zwischen Replikation und Reproduktion zu treffen ... Zellen können sich reproduzieren, aber nur Moleküle können sich replizieren. [...]'“ *(Dys01)*

9 In einem Artikel *(Fre10),* der sich mit Sonden, die zu anderen Himmelskörpern entsandt werden sollen, beschäftigt, wird u.a. der Begriff „SEED“ gebraucht.

euklidischen Axiomensystem mit Recht eine Krönung der mathematischen Wissenschaft des antiken Kulturkreises. Unsere heutige Faustische Mathematik hat das Prinzip des Axiomensystems in der ihr eigenen Art weiterentwickelt. Wir bauen gewissermaßen im ideenlosen Raum abstrakte Axiomensysteme auf, die zunächst nur rein formale Struktur haben und dann auf beliebige Modelle angewandt werden können, während Euklid stets nur das konkrete geometrische Axiomensystem im Auge hatte. Ich glaube aber nicht, dass die Dynamik unseres Kulturkreises in diesen Axiomensystemen schon voll zum Ausdruck kommt. Schließlich haben sie alle das eine gemeinsam, dass man ein mathematisches Gebäude auf diese Axiome zurückführen kann. Es fehlt uns aber noch die Theorie der automatischen Entfaltung eines ganzen mathematischen Gebäudes [...] aus einer gegebenen Keimzelle heraus. So kommen wir von Axiomensystemen, auf die ein vorhandenes System zurückgeführt wird, zu solchen, aus denen sich nach vorgegebenem Schlüssel ein mathematisches Lehrgebäude entfaltet.“

Schlußbemerkung

Konrad Zuses Arbeiten zur Feldrechenmaschine, zum Rechnenden Raum und zur Selbstreproduktion, in denen er in höchst innovativer Weise die damals noch nicht publizierte Theorie der Zellularautomaten anwandte, machen augenfällig, über welch grandiose Intuition er verfügte.

Anhang

Logisches Schema der Selbstreproduktion (nach J. von Neumann)

1) Sei A ein Automat, der zu einer gegebenen Beschreibung I den entsprechen den Automaten konstruiert.
   Sei B ein Automat, der zu einer beliebigen Beschreibung I eine Kopie davon herstellen kann.

2) Sei C ein Steuerautomat für die Automaten A und B, wobei A mit der Beschreibung I versehen ist.
   Das aus A, B und C bestehende Aggregat werde S(I) genannt.

3) Zunächst veranlasst der Steuerautomat C den Automaten A, den durch die Beschreibung I spezifizierten Automaten zu konstruieren.
   Dann weist C den Automaten B an, die Beschreibung I zu kopieren und diese Kopie dem (durch A) konstruierten Automaten zu übergeben.

4) C trennt dieses Konstrukt von S(I).

Sei s die Beschreibung von S; dann ist S(s) selbstreproduzierend.

Literatur

[Ale07] ALEX, JÜRGEN (2007): Zur Entstehung des Computers. VDI-Verlag, Düsseldorf.

[Bek03] BEKENSTEIN, JACOB D. (2003): Das holografische Universum. Spektrum der Wissenschaft, Nov. 2003, 34–41.

[Ber85] BERLEKAMP,ELWYN R., John H. Conway & Richard K. Guy (1985): Gewinnen – Strategien für mathematische Spiele. Band 4, Solitairspiele Vieweg, Braunschweig, 1985. (Englische Originalversion 1982)

[Del09] DELIUS, FRIEDRICH CHRISTIAN (2009): Die Frau, für die ich den Computer erfand. Rowohlt, Berlin.

[Dys01] DYSON, GEORGE B. (2001): Darwin im Reich der Maschinen. Springer, Wien, New York.

[Fal07] FALKENBURG, BRIGITTE & RENATE HUBER: Die Welt als Maschine – eine Metapher. Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3/07, 20–26.

[Fre10] FREITAS JR., ROBERT A. (8.5.2010): A self-reproducing interstellar probe. www.rfreitas.com/Astro/ReproJBISJuly1980.htm

[HiloJ] HILLIS, DANIEL (3.5.2010): Richard Feynman and The Connection Machine.www.longnow.org/essays/richard-feynman-connection-machine/

[Ila01] ILACHINSKI, ANDREW (2001): Cellular Automata – A Discrete Universe. World Scientific Publ., Signapore.

[Kem55] KEMENY, JOHN G. (1955): Man viewed as a machine. Sci. American 192 , No. 4, 58–67.

[Kin82] KINDLERS Literaturlexikon, Band VII . Zweiburgen-Verlag, Weinheim, 1982, p. 9751.

[Lan84] LANGTON, CHRISTOPHER G. (1984): Self-reproduction in cellular automata Physica D 10, 135–144.

[Llo07] LLOYD, SETH: Das Universum hacken. Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3/07, 34–39.

[Mac94] MACRAE, NORMAN (1994): John von Neumann. Birkhäuser, Basel.

[Neu66] NEUMANN, JOHN VON (edited and completed by ARTHUR W. BURKS) (1966): Theory of Self-Reproducing Automata. University of Illinois Press, Urbana.

[Ree03] REES, MARTIN (2003): Unsere letzte Stunde. Bertelsmann, München.

[Spe79] SPENGLER, OSWALD (1979): Der Untergang des Abendlandes. C.H. Beck, München, 176.–195. Tsd. d. 1. bzw. 155.–174. Tsd. d. 2. Bd. d. Gesamtaufl.

[Thi07] THIEMANN, THOMAS: Die Suche nach dem heiligen Gral. Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3/07, 58–67.

[Ula52] ULAM, STANISLAW (1952): Random processes and transformations. Proc. of the Intern. Congress of Mathematicians 1950, vol. II, 264–275; Amer. Math. Soc., Providence, RI.

[Vol95] VOLLMAR, ROLAND & THOMAS WORSCH (1995): Modelle der Parallelverarbeitung. Teubner, Stuttgart.

[Vol05] VOLLMAR, ROLAND (2005): Das wissenschaftliche Werk Konrad Zuses. In: WILHELM MONS, HORST ZUSE & ROLAND VOLLMAR: Konrad Zuse. Ernst Freiberger-Stiftung, o.O., 71–99.

[Vol06] VOLLMAR, ROLAND : John von Neumann and self-reproducing cellular automata. J. of Cellular Automata, 1, 353–376.

[Wi10a] WIKIPEDIA (9.5.2010): Der Untergang des Abendlandes. de.wikipedia.org/wiki/Der_Untergang_des_Abendlandes

[Wi10b] WIKIPEDIA (8.5.2010): Self-replicating machine. en.wikipedia.org/wiki/Self-replicating_machine

[Zem59] ZEMANEK, HEINZ (23.3.1959): Brief an Konrad Zuse. Archiv des Deutschen Museums, München.

[Zus57] ZUSE, KONRAD (1956/57): Gedanken zur Automation und zum Problem der technischen Keimzelle. Unternehmensforschung, Bd. 1, Heft 4, 160–165.

[Zus58] ZUSE, KONRAD (1958): Die Feldrechenmaschine. MTW-Mitteilungen, Nr. V/4, 119–126.

[Zus67] ZUSE, KONRAD (1967): Über sich selbst reproduzierende Systeme. Elektronische Rechenanlagen, 9, 57–64.

[Zus68] ZUSE, KONRAD (1968): 1. Konzept für das Buch „Der Computer mein Lebenswerk“. Konrad Zuse Internet Archive. www.zib.de/zuse, Dokument ZuP 030/004. 20.5.2010.

[Zus69] ZUSE, KONRAD (1969): Rechnender Raum. Vieweg, Braunschweig, 70 S.

[Zus75] ZUSE, KONRAD (1975): Ansätze einer Theorie der Netzautomaten. Nova Acta Leopoldina, Neue Folge, Nr. 220, Band 43, Halle/Saale, 46 S.

[Zus77] ZUSE, KONRAD (1977): Zusammenfassender Bericht über meine bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet zellularer Automaten. In: ULRICH GOLZE & ROLAND VOLLMAR: Beiträge zur Theorie der Polyautomaten. Informatik-Berichte, Nr. 7703, Technische Universität Braunschweig, 117–121.

[Zus79] ZUSE, KONRAD (29.8.1979): Der Computer – Rückblick und Ausblick – Bericht der GMD, St. Augustin, 14 S.

[Zus82] ZUSE, KONRAD (1982): The computing universe. Int. J. Theor. Physics, 21, 589–600.

[Zus84] ZUSE, KONRAD (1984): Der Computer – Mein Lebenswerk. Springer, Berlin, Heidelberg.

[Zus85] KONRAD ZUSE im Gespräch mit Dieter Balkhausen: Es steht immer irgendwie ein Mephisto dahinter ... FR 2.7. 85 (Auszüge aus dem am 25.6.85 im ZDF ausgestrahlten Interview).

[Zus91] ZUSE, KONRAD: Rechnender Raum. Vortrag anlässlich des Arbeitsgesprächs „Physik und Informatik – Informatik und Physik“ am 22. Nov. 1991.

[Zus93] ZUSE, KONRAD (Dez. 1993): Cellular Structured Space (Rechnender Raum) and Physical Phenomena. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), TR 93-12.